

# **SIMULACIÓN DE UN PEAJE URBANO EN LA CIUDAD DE MADRID**

**Cristina Valdés**

Investigadora, Transyt-UPM, España

**Andrés Monzón**

Catedrático de Transportes, ETSI Caminos, Canales y Puertos –Universidad Politécnica de Madrid, España

**Francisco García Benítez**

Catedrático de Transportes, Escuela de Ingenieros –Universidad de Sevilla, España

**Floridea Di Ciommo**

Investigadora Sénior, Transyt-UPM, España

## **RESUMEN**

El peaje urbano ha demostrado ser una de las medidas más efectivas a la hora de promover un cambio en el reparto modal, como ha quedado demostrado en diversas ciudades como Londres o Estocolmo. Los efectos, no obstante, son muy diferentes según el esquema de peaje implantado, pudiendo incluso provocar efectos adversos en algunas zonas.

En el contexto de las políticas de tarificación de carreteras, el peaje urbano debe ser tratado de forma diferente debido a sus características específicas. Las áreas urbanas y metropolitanas son las más afectadas por la congestión, y a su vez son dónde se realizan la mayor parte de los desplazamientos diarios, muy sensibles a la implantación de un peaje debido a su frecuencia.

En este caso, se ha definido una metodología para analizar la implantación de un peaje urbano tipo cordón en la ciudad de Madrid. Para ello, se ha utilizado un modelo de transporte que comprende toda la región de Madrid, tanto la red viaria como la red de transporte público, lo cual permite analizar los efectos no sólo en el área de estudio sino en el conjunto de la región.

Los resultados se han analizado en términos del cambio modal, tiempo de viaje y coste para los usuarios.

**Palabras clave:** modelización, peaje urbano

## 1 INTRODUCCIÓN

La congestión es uno de los principales problemas a los que las ciudades se tienen que enfrentar (COM, 2007), teniendo en cuenta que la economía Europea pierde cada año un 1% de su PNB como consecuencia de la pérdida de tiempo y el daño ambiental causados por aquella.

La imposición del peaje urbano es considerada como una de las medidas más efectivas para disminuir la congestión del tráfico en las áreas metropolitanas (Ministry of Transport, 1964). En cualquier caso, para implementar un sistema de peaje aceptable y exitoso, cada ciudad debe tener en cuenta su propia estructura y sus patrones de movilidad.

España está actualmente desarrollando el Plan Nacional de Mejora de la Calidad del Aire (MMARM, 2011), dónde una de las medidas propuestas es la introducción de un peaje urbano, con el objetivo de reducir dos costes externalizados importantes, como son el tráfico y el tiempo de viaje. Al igual que otros países de la UE, España está obligada a considerar la política de transporte de la Unión Europea y las regulaciones que definen y promueven los sistemas de peaje basados en los costes externalizados.

La Comunidad de Madrid tiene más de 6 millones de habitantes en un área de 8.000 km<sup>2</sup>, con una densidad de población media de 7,42 habitantes/hectárea. Aunque en los últimos años Madrid ha experimentado un significativo proceso de dispersión urbana, el centro de Madrid (en adelante, Área Central) aún concentra una parte significativa tanto de población como de puestos de trabajo: más del 20% de la población y del 36% de los empleos de la Comunidad de Madrid están localizados en el Área Central de Madrid.

El objetivo de este artículo es evaluar la posible implantación de un sistema de peaje tipo cordón para acceder al centro de la ciudad durante la hora punta matutina. Se han definido tres cordones diferentes, el primero de ellos en torno al distrito centro, uno intermedio delimitado por una serie de rondas y avenidas que componen lo que podría denominarse la M-20, y el anillo más externo corresponde a la M-30, primera vía de circunvalación actualmente integrada en la ciudad; esta vía divide Madrid en dos áreas: el Área Central y los distritos Periféricos.

## 2 EL PEAJE EN ÁREAS URBANAS

Aunque las aproximaciones teóricas a este tema tienen una larga historia, no fue sino hasta hace pocas décadas que el peaje urbano comenzó a implantarse en las ciudades europeas. Noruega fue el primer país en introducir estas medidas en Bergen (1986), Oslo (1990) y Trondheim (1991), dedicando los beneficios a la inversión en infraestructuras de carreteras. Los casos de Londres (2003) y Estocolmo (2006) difieren de los anteriores en que el beneficio se destinó a mejorar el transporte público.

Este cambio parece contribuir a la aceptación pública del sistema, ya que el peaje urbano parece ser más aceptable cuando la proporción de transporte público ya es alta y el beneficio del peaje retorna a la sociedad a través de dichas mejoras en el transporte público (Armeliuss et al, 2006).

El Sistema de Peaje por Congestión del Centro de Londres (Central London Congestion Charging Scheme) se inauguró el 17 de Febrero de 2003. El área afectada, delimitada por la ronda interior, corresponde al centro de Londres: un área de 22 km<sup>2</sup> (que representa el 1,3% de los 1.579 km<sup>2</sup> del Gran Londres), con 150.000 habitantes y 1.200.000 empleos.

El sistema implementado es de tipo cordón, activo de Lunes a Viernes, de 9 am a 5 pm y con una tarifa plana (inicialmente de 5£ por vehículo/día en 2003). Esta medida, acompañada por varias otras de mejora del transporte público, produjo un decremento del 18% en el número de vehículo que entraban en el área afectada y un 15% de decremento en términos de vehículo/km (TfL, 2004).

En el caso de Estocolmo, el proyecto se introdujo inicialmente con un periodo de prueba de seis meses (3 de Enero al 31 de Julio de 2006), sometiéndose su permanencia a votación, siendo ésta finalmente favorable a su mantenimiento. El área afectada cubre una zona de unos 30 km<sup>2</sup>, con menos de 300.000 habitantes, de los cuales aproximadamente 60.000 trabajan fuera de la zona, y con casi 23.000 centros de trabajo, que emplean a unas 318.000 personas, de las que más de dos tercios viven fuera de la zona tarifada. El peaje tipo cordón se implantó en los días laborables, de 6:30 a 18:30, con un importe máximo diario de 6,60 € y en combinación con un incremento del transporte público y la introducción de un servicio de aparcamiento disuasorio. Esto produjo un decremento del 22% en el número de vehículos que entraban en el área afectada y un 15% de decremento en términos de vehículo/km (Eliasson et al, 2011).

El caso de Estocolmo es un buen ejemplo de cómo los peajes pueden ser aceptados por el público cuando se implementan de manera correcta.

### 3 CASO DE ESTUDIO

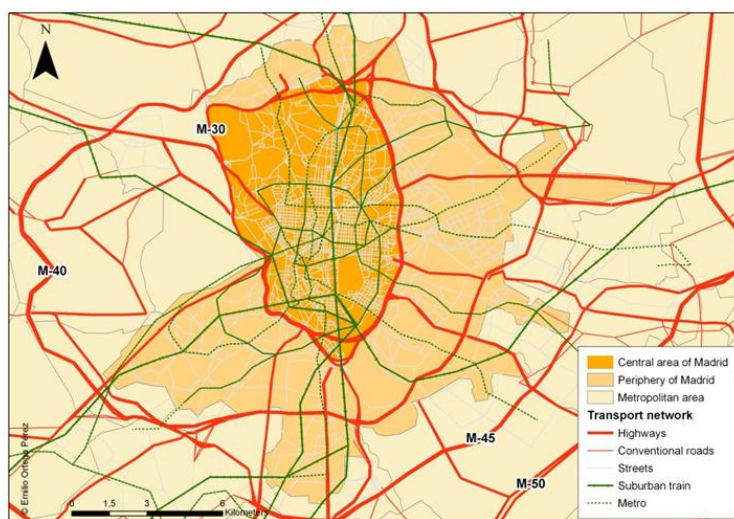
#### 3.1 Caracterización del caso de estudio

La Comunidad Autónoma de Madrid (CAM) tiene una superficie de 8.000 km cuadrados y una población de 6 millones de habitantes. A pesar de la dispersión urbana de los últimos años, la ciudad de Madrid todavía mantiene un porcentaje importante de empleo y población, un 53% y un 66% del total de la CAM, respectivamente.

Considerando solamente la ciudad de Madrid, el Área Central (AC), definida como el área delimitada por la M-30 (el primer anillo viario que rodea Madrid), contiene el 37,5% de la población y el 54% de los empleos de la ciudad, en tan sólo un 10% de la superficie de la misma.

La red de carreteras (Figura 1) tiene una estructura radial, con ocho autovías principales de entrada a la ciudad de Madrid y cuatro autovías de circunvalación: la M-30 que ha sido absorbida en la ciudad y funciona como una vía distribuidora local; la M-40, que rodea la mayor parte de la ciudad de Madrid y es la vía más congestionada de la CAM; y la M-45 y la M-50, ambas anillos incompletos.

Respecto a la oferta de transporte público, tiene aún, si cabe, más estructura radial (ver Figura 1), especialmente los sistemas ferroviarios (metro y tren de cercanías).



**FIG 1 Esquema de la red viaria y de transporte público de Madrid**

Como resultado de esta estructura, así como de la distribución residencial y de empleos, casi uno de cada dos viajes diarios (46%) acceden/salen del Área Central. Es valioso mencionar que el uso del transporte público para estos viajes de acceso/salida es un 8% mayor que el uso medio de transporte público en la región (41% frente a 33%).

## 3.2 El modelo de transportes de la Comunidad de Madrid

En este contexto, se han simulado diferentes anillos de peaje dentro del Área Central de Madrid.

La herramienta utilizada para dicha simulación es un modelo de demanda de viajes que incluye un modelo de red de las principales carreteras de la región (6.350 km), con un mayor nivel de detalle en la ciudad de Madrid, particularmente en el centro urbano.

Se consideran cuatro funciones velocidad/intensidad de tipo BPR para estimar el tiempo actual de viaje en coche privado, dependiendo del tipo de arco, con el siguiente esquema:

$$t_{cur} = t_0 \times (1 + a \times (\frac{q}{q_{max} \times c})^b) \quad (1)$$

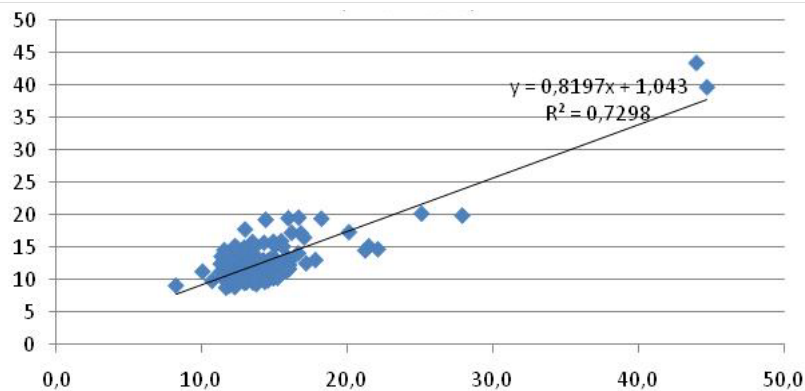
Donde  $t_{cur}$  es el tiempo actual de viaje,  $t_0$  el tiempo a velocidad máxima (en flujo libre),  $q$  el volumen de tráfico,  $q_{max}$  la capacidad de la vía, y  $a$ ,  $b$  y  $c$  son parámetros para cada tipo de arco (ver Tabla 1). Fueron ajustados usando la correspondencia entre velocidad y volumen de tráfico horario por hora y por carril para cada tipo de sección de carretera estimada para España en el modelo META (Di Ciommo et al, 2010).

Función BPR	a	b	c
Autovía	1,68	9,64	0,96
Carretera	2,27	7,66	0,88
Calle	3,92	2,45	0,5
Avenida	3,92	2,45	0,6

TABLA 1. Parámetros de las funciones BPR

El modelo de red también incluye la oferta de transporte público: 447 líneas (autobús, metro y tren) con una longitud total de 17.593 km.

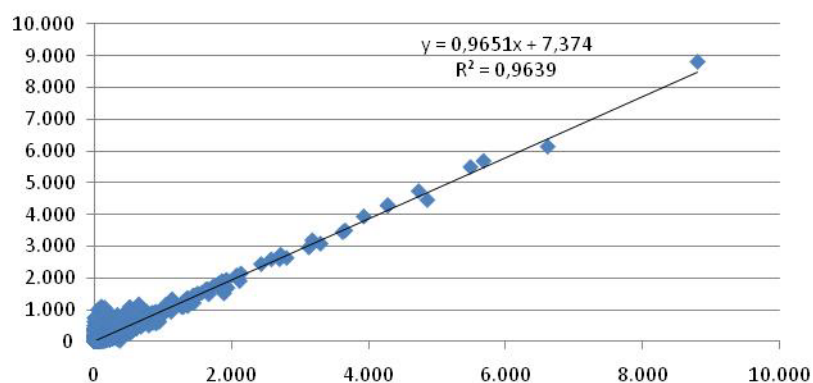
Las velocidades comerciales de los modos con plataforma dedicada (metro y tren) se obtuvieron del informe anual del Consorcio de Transportes (CRTM, 2004a), mientras que la velocidad del autobús fue calibrada con datos reales proporcionados por el Área de Metro y EMT del Consorcio de Transportes (CRTM, 2004b). El ajuste regresivo infiere un coeficiente  $R^2$  de 0,73, con una función de ajuste dada por  $Y=0.8197 \cdot X + 1.043$ , como se muestra en la Figura 2, donde el eje de abscisas refleja las velocidades del modelo y el de ordenadas las velocidades observadas.



**FIG 2 Ajuste de velocidades del transporte público**

La matriz de origen-destino (matriz O-D) para la hora punta se obtuvo de la Encuesta de Movilidad llevada a cabo por el Consorcio de Transportes en 2004 (CRTM, 2006). Esta encuesta se llevó a cabo en la Comunidad de Madrid, entrevistando a 35.000 familias sobre sus viajes diarios.

La matriz O-D fue calibrada usando 257 medidores de flujo de tráfico del Ministerio de Fomento, del Gobierno de la CAM y del Ayuntamiento de Madrid (DGMA, 2004; MF, 2004, Ayuntamiento de Madrid, 2004). El ajuste en curva arroja un coeficiente  $R^2$  de 0,96, con una función de ajuste expresada por  $Y=0.9651 \cdot X + 7.374$  (Figura 3), donde el eje de abscisas representa los viajes estimados y el de ordenadas los viajes observados.



**FIG 3 Ajuste de tráfico**

### El modelo de elección modal

El modelo definido es un modelo logit binomial. Este modelo fue elegido entre una amplia serie de modelos agregados, por ser el que presentaba un mejor ajuste.

Los costes generalizados para cada una de las alternativas (coche privado CP y transporte público TP) se definen como:

$$\text{Coche Privado: } GC_C = \text{Tiempo viaje} + COP + C_{PEAJE}$$

Donde los costes de operación y los costes de peaje se calculan mediante la siguiente formulación:

$$COP = \frac{L(km) * C\left(\frac{\text{€}}{km}\right)}{TV\left(\frac{\text{€}}{h}\right)} \quad (2)$$

$$C_{PEAJE} = \frac{T(\text{€})}{VT\left(\frac{\text{€}}{h}\right)} \quad (3)$$

Transporte Público:  $CG_{PT} = \text{Tiempo viaje} + \text{Tarifa}$

El valor del tiempo (VT) considerado, 9€hora, se ha obtenido evaluando el modelo de demanda de viajes con las autopistas de peaje existentes en Madrid. Un valor similar del tiempo se estimó para la segunda mayor área metropolitana de España: Barcelona (Salas et al, 2009).

Las funciones de Utilidad diferencian entre pares de zonas y están definidas mediante las siguientes variables:

- $P_D$ : variable dummy que diferencia las zonas de destino con aparcamiento libre de las que lo tienen regulado,
- $DP_D$ : densidad de población en el destino,
- $DIS$ : distancia entre origen y destino,

$$U_C = \alpha_1 \times \frac{CG_C}{\sum(CG_C + CG_{TP})} + \alpha_2 \times P_D + \alpha_3 \times DP_D + \alpha_4 \times DIS + \alpha_5 \quad (4)$$

$$U_{TP} = \alpha_1 \times \frac{CG_{TP}}{\sum(CG_C + CG_{TP})} \quad (5)$$

La Tabla 2 contiene los parámetros del modelo inferido que mejor se ajusta a los datos.

Los coeficientes B corresponden a los coeficientes de cada una de las variables independientes en la ecuación de regresión para predecir la variable dependiente, mientras los coeficientes Beta corresponden a esos mismos coeficientes en el caso de que todas las variables estuvieran estandarizadas para tener una media de cero y una desviación estándar de uno.

El estadístico t pone de manifiesto la significancia estadística de las distintas variables consideradas en el modelo

Variables	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t
	B	Error Tipico	Beta	
Constant	2.886	0.028		104.865
CG <sub>C</sub> , CG <sub>TP</sub>	1.400	0.026	0.128	54.776
P <sub>D</sub>	-0.723	0.013	-0.127	-57.523
DIS	-9,274E-05	0.000	-0.308	-137.130
DP <sub>D</sub>	-4,093E-05	0.000	-0.141	-69.631

TABLA 2. Parámetros del modelo logit estimado

### El procedimiento de asignación

Tomando como punto de partida las matrices de viajes por modo iniciales, es decir, las del Escenario de Referencia, se estiman las nuevas matrices de viajes por modo para cada uno de los escenarios, siendo éste un proceso iterativo que termina cuando las matrices O-D convergen en dos iteraciones sucesivas. El proceso se resume en la Figura 4.

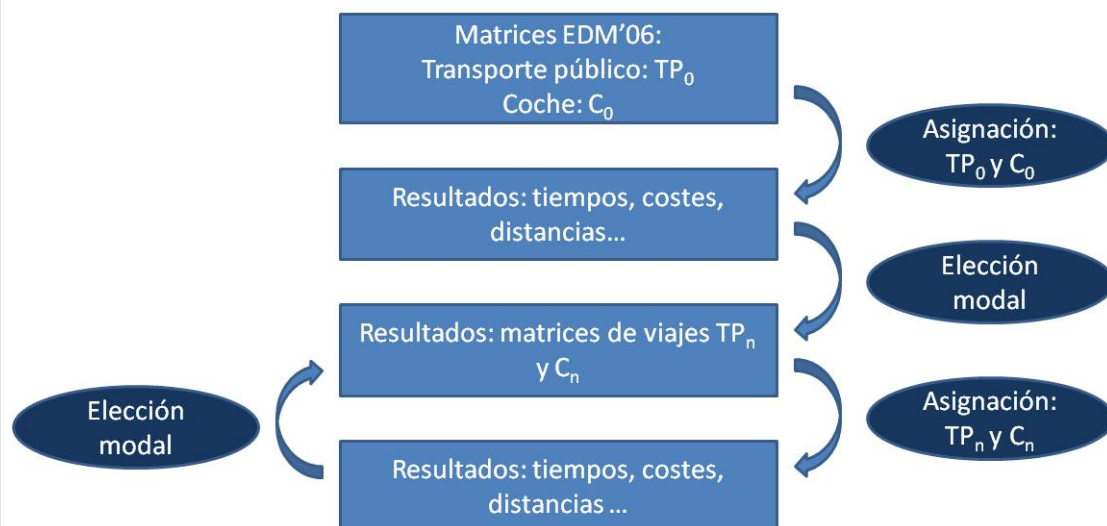
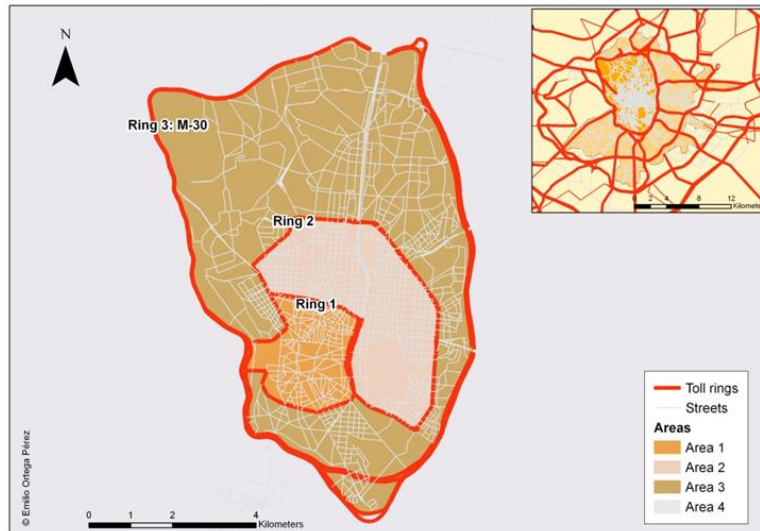


FIG 4 Procedimiento de asignación



### 3.3 Escenarios

Se han definido tres anillos de peaje distintos en el interior de la ciudad de Madrid, considerando el interior de la ciudad como el área delimitada por la autovía de circunvalación M-30. Estos tres anillos dividen la zona en cuatro áreas (Figura 5).



**FIG 5 Localización de los anillos de peaje definidos**

El análisis considera tres escenarios en los cuales se ha definido un sistema de cordón simple que recoge un peaje de entrada de 4 euros a una de las tres áreas: el peaje de entrada al primer área se modeliza en el Escenario 1 (E1), a la segunda área en el Escenario 2 (E2) y a la tercera área en el Escenario 3 (E3). El precio del peaje (4€) se ha seleccionado en consonancia con la renta per cápita de Madrid y el ratio tarifa/renta per cápita de Londres

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Efectos en la demanda de viajes

Cuando se analizan los resultados de los escenarios de cordón simple (E1, E2 y E3) en términos de cambio del reparto modal, la variación es más significativa en el Escenario 3; sin embargo, aunque el área que abarca el peaje es casi cuatro veces la del Escenario 2, la diferencia en el reparto modal entre ambos escenarios es sólo de un 0,7%. Un cuadro resumen de los resultados se muestra en la Tabla 3. Un análisis más detallado de los datos revela que, mientras que los viajes hacia el Área Central en coche privado decrecen en el Escenario 3 en un 61% más que en el Escenario 2, los viajes en coche hacia el Área Central en el Escenario 3 se mantienen prácticamente constantes con respecto al Escenario de Referencia (E0), e incluso se incrementan en un 12% en comparación con el Escenario 2. Esto sucede porque el área (A3) delimitada por la M-30 es suficientemente grande como para contener viajes de duración suficiente como para beneficiarse de la disminución de la congestión, debida a los viajeros que evitan entrar desde fuera del área.

De forma opuesta, áreas de peaje excesivamente pequeñas resultan demasiado fáciles de evitar, y los viajeros encontrarán nuevas rutas para rodearlas de forma que sea rentable evitar el peaje.

En términos de vehículo/km, los beneficios de la implantación de un peaje de acceso al Área A1 (Escenario 1) se concentran dentro del área, con un descenso del 10% del tráfico, mientras que en el resto del área Central (A2 y A3) el decremento es de alrededor del 4%, y sólo de un 1% para el resto de la CAM.

Los escenarios 2 y 3 muestran un efecto más distribuido: el Escenario 2 es el óptimo para el Área Central (AC) mientras el Escenario 3 es el óptimo para la CAM.

Tipo de viaje	Base	E1	E2	E3
Interno AC	34.876	33.391	31.045	34.726
Acceso AC	56.897	53.872	48.818	43.888
Salida AC	40.896	40.279	39.653	40.804
Externo AC	142.383	142.274	141.990	140.121
Total	275.052	269.816	261.506	259.539

TABLA 3. Variación de los viajes en coche con respecto al escenario base

	Base	E1		E2		E3	
Area 1	36.156	32.483	-10,2%	31.576	-12,7%	33.451	-7,5%
Area 2	232.980	220.685	-5,3%	205.312	-11,9%	216.992	-6,9%
Area 3	546.259	525.637	-3,8%	494.307	-9,5%	502.178	-8,1%
Anillo 3: M-30	32.030	31.188	-2,6%	29.230	-8,7%	29.805	-6,9%
Exterior M-30	3.731.463	3.693.713	-1,0%	3.640.993	-2,4%	3.581.259	-4,0%
Total	4.309.752	4.250.538	-1,4%	4.164.530	-3,4%	4.113.242	-4,6%

**TABLA 4. Variación de los veh-km por área**

## 4.2 Ahorro de tiempo

Cuando se implementa un sistema de peaje de cordón simple, los ahorros de tiempo crecen con la superficie del área afectada. Este comportamiento también se produce en los ingresos obtenidos. Pero estos dos indicadores, ahorro de tiempo e ingresos obtenidos, no crecen proporcionalmente: por ejemplo, una comparación del Escenario 2 y el Escenario 1 muestra que mientras que el ahorro de tiempo se incrementa un 92%, los ingresos obtenidos se incrementan un 177%. Esto significa que el coste de los ahorros de tiempo se incrementa un 44%. Por tanto, debería considerarse un tercer indicador: el “coste” del ahorro de tiempo, que mide la eficacia socio-económica del sistema de peaje.

Siguiendo la definición de Laird y Mackie de los métodos de valoración de las políticas del transporte (Laird y Mackie, 2009), adoptamos un indicador de eficiencia económica del transporte (EET) en el que se considera el ahorro de tiempo de la sociedad en su conjunto frente al incremento de costes por peaje. Más específicamente, si el ratio entre los ingresos del peaje y el valor del tiempo ahorrado es más alto, significa que la eficiencia económica de esta medida del transporte es menor, ya que los usuarios pagarán un precio más alto con respecto al ahorro de tiempo supuesto por evitar la congestión. En otras palabras, el excedente del consumidor es menor porque la diferencia entre el deseo de pago del usuario y el precio pagado para evitar la congestión es también menor. Siguiendo las premisas del análisis del beneficio económico e identificando la maximización de la función de bienestar social con la maximización de la suma de los excedentes de todos los consumidores, un ratio más bajo entre los ingresos percibidos y el valor del ahorro de tiempo maximiza los beneficios de los viajeros (tanto de vehículo privado como de transporte público) incluidos en la función de bienestar social. Por tanto, el escenario E3 debería ser elegido para maximizar dicha función.

INDICADOR	Referencia	E1	E2	E3
Tiempo de viaje (horas)	353.929	351.534	349.372	346.882
Ahorro de tiempo (horas)		-2.395	-4.558	-7.047
Vehículos accediendo anillo 1	18.346	15.166 (*)	14.785	16.222
Vehículos accediendo anillo 2	53.480	49.810	42.160 (*)	47.213
Vehículos accediendo anillo 3	56.610	54.240	50.778	44.082 (*)
Ingresos por peaje		60.664	168.640	176.328
Coste del tiempo ahorrado (€/ hora).		25,3	37,0	25,0

(\*) Vehículos que pasan a través del peaje

**TABLA 5. Ahorro de tiempo y coste del peaje: el coste del tiempo ahorrado**

## 5 CONCLUSIONES

Las experiencias de Londres y Estocolmo han confirmado la efectividad de la puesta en servicio de un sistema de peaje. Ahora bien, el sistema óptimo dependerá de los objetivos a alcanzar. Así, hemos visto en el capítulo anterior que, si el objetivo es reducir el tráfico en Área Central, entonces un anillo de acceso a dicho área no es la mejor opción, siendo preferible un peaje de acceso al área A2. Sin embargo, si el objetivo es el tráfico en el conjunto de la región o minimizar el coste del ahorro de tiempo por parte de los usuarios, entonces un peaje de acceso al área delimitada por la M-30 es la solución óptima.

La literatura recoge que sistemas de peaje más complejos, con más de un cordón, producen mejores resultados ya que interceptan un mayor número de vehículos y dificultan la posibilidad de evitar el peaje mediante rutas alternativas (May et al, 2002). A partir de los resultados obtenidos en los escenarios con un único cordón de peaje, se van a analizar nuevos escenarios con cordones de peaje más complejos que sirvan para contrastar la hipótesis anterior.

## 6 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos al Consorcio de Transportes de la Comunidad de Madrid que nos haya facilitado la información en la que se ha apoyado esta investigación.

También agradecemos a José María del Castillo, Profesor de la Universidad de Sevilla, por sus consejos y por las fructíferas discusiones durante la estimación del modelo de reparto modal, y a Emilio Ortega, profesor de la UPM e investigador de TRANSyT por su colaboración en la definición de los mapas.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

Ayuntamiento de Madrid, Área de Gobierno de Seguridad y Movilidad (2004). Intensidad Media Diaria.

ARMELIUS, H. y HULTKRANTZ, L., (2006). The Politico-Economic link between public transport and road pricing: an ex-ante study of the Stockholm road-pricing trial. *Transport Policy*, 13 (2), 162-172.

COM (2007). Commission of the European Communities. Towards a New Culture for Urban Mobility.(COM 2007(551)).

CRTM, (2004a) Consorcio de Transportes de Madrid. Memoria anual

CRTM, (2004b). Área de Metro y EMT del Consorcio de Transportes de Madrid.

CRTM, (2006). Consorcio de Transportes de Madrid. Encuesta domiciliaria de movilidad en día laborable 2004

DI CIOMMO, F. MONZÓN, A. y COMENDADOR, J. Road transport social costs in Spain: a new rationale for pricing policy, 12th WCTR, Lisbon, Portugal, 2010, 1-26

DGMA (2004). Dirección General de Carreteras de la Comunidad de Madrid (2004). Mapa de tráfico 2004.

ELIASSEN, J., HULTKRANTZ, L., NERHAGEN, L., ROSQVIST, L.S. (2006) The Stockholm congestion – charging trial 2006: Overview of effects. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43, no. 3. 240-250.

LAIRD, J. y MACKIE, P. (2009). Review of Economic Assessment in Rural Transport Appraisal. *Transport Research Series*, I.f.T. Studies, Editor. University of Leeds: Leeds, UK. p. 1-96.

MAY, A.D., LIU, R., SHEPHERD, S.P. y SUMALEE, A. (2002). The impact of cordon design on the performance of road pricing schemes. *Transport Policy*, 9, pp 209-220

MF (2004). Ministerio de Fomento. Mapa de tráfico 2004.

MMARM (2011). Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino. Plan Nacional De Mejora De La Calidad Del Aire.

Ministry of Transport of the UK (1964). Road Pricing: The economic and technical Possibilities. HMSO, London.

SALAS, R., ROBUSTÉ, F. y SAURÍ, S. (2009). Impact of two-part pricing scheme on social welfare for congested metropolitan Expressway networks. Transportation Research Record, no 2115, pp. 102-109

TfL (2004). Central London Congestion Charging Impacts Monitoring Second Annual Report, Transport For London